中国生态农业学报 2016 年 7 月 第 24 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2016, 24(7): 874−882

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151371

半干旱雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响*

韩凡香[1] 常 磊[2] 柴守玺[2**] 杨长刚[2] 程宏波[1] 杨德龙[1]
李 辉[3] 李博文[2] 李守蕾[2] 宋亚丽[2] 兰雪梅[2]

(1. 甘肃农业大学生命科学技术学院 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 3. 兰州城市学院 兰州 730070)

摘 要 水分不足是限制半干旱雨养作物生长的主要因素，地表覆盖能够改善土壤的微环境，从而显著提高作物的产量和水分利用效率。为明确西北半干旱雨养区不同保墒措施下旱地马铃薯的土壤水分特征及其对产量的影响，于 2014—2015 年设置了玉米秸秆带状覆盖种植(T1)、半膜大垄(T2)、全膜双垄(T3)和露地平作(对照，CK) 4 种栽培模式，研究了玉米秸秆带状覆盖、地膜覆盖种植对马铃薯产量、土壤水分变化及其利用效率的影响。结果表明：不同覆盖方式能有效改善马铃薯生育期 0~200 cm 土层土壤水分状况，地膜覆盖对马铃薯生育前期土壤水分保蓄效果较好，秸秆带状覆盖对生育中后期土壤水分状况的改善效果明显。与对照(CK)相比，3 种覆盖处理均提高了土壤含水量，其中 T1 处理效果最好，较 CK 提高 2.8%~7.8%，尤其在伏旱阶段的块茎形成期，0~200 cm 土层土壤含水量高于地膜覆盖处理。与 CK 相比，T1 处理马铃薯产量提高 10.5%~34.2%，水分利用效率(WUE)提高 8.9%~29.8%，达 108.9~134.0 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$，商品薯率提高 14.7%~38.8%，达 82.3%~92.2%。马铃薯产量与生育期耗水量(r=0.836**)呈显著正相关。T1 的产量和商品薯率均显著高于 T2 和 T3(P<0.05)。可见，玉米秸秆带状覆盖具有显著的纳雨保墒作用，促进马铃薯的生长发育，增产效果显著。其推广应用可有效提高该区降水资源的利用效率，实现马铃薯稳产高产，可作为西北雨养农业区旱地马铃薯生产的高效栽培新模式。

关键词 玉米秸秆 带状覆盖 地膜覆盖 土壤水分 产量 水分利用效率 半干旱雨养区 马铃薯
中图分类号： S532; S318 **文献标识码：** A **文章编号：** 1671-3990(2016)07-0874-09

Effect of straw strip covering on ridges on soil water content and potato yield under rain-fed semiarid conditions*

HAN Fanxiang[1], CHANG Lei[2], CHAI Shouxi[2**], YANG Changgang[2], CHENG Hongbo[1], YANG Delong[1], LI Hui[3], LI Bowen[2], LI Shoulei[2], SONG Yali[2], LAN Xuemei[2]

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science / College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Lanzhou City College, Lanzhou 730070, China)

Abstract Water deficiency is the main factor limiting crop growth in semiarid regions under rain-fed agriculture. Mulching can improve soil micro-environment and thus significantly increase crop yield and water use efficiency. In order to evaluate the effects of different strategies of soil-moisture conservation on soil water content and potato yield in semiarid regions under rain-fed agriculture in Northwest China, four mulching modes — maize-straw strip covering on no-planted ridge (T1), plastic

---

* 公益性行业(农业)科研专项(201303104)和现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-3-2-49)资助
** 通讯作者：柴守玺，主要从事作物生态生理的研究。E-mail: sxchai@126.com
韩凡香，主要从事作物生态生理的研究。E-mail: 18293105059@163.com
收稿日期：2015−12−28 接受日期：2016−03−28

* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303104) and the Special Fund for the Industrial Technology System Construction of Modern Agriculture (CARS-3-2-49).
** Corresponding author, E-mail: sxchai@126.com
Received Dec. 28, 2015; accepted Mar. 28, 2016

film mulching on planted ridge only (T2), plastic film mulching on both planted ridge and no-planted furrow (T3) and flat field planting without mulching (CK) — were set in potato cultivation in 2014–2015. Potato yield and water use efficiency (WUE), and soil water content were investigated. The results showed that mulching greatly improved soil water storage at the 0–200 cm soil layer during potato growth stage. Plastic film mulching had positive effects on soil water storage at the early stage of potato growth, while straw mulching significantly improved soil water storage at the later growth stage. The optimal water storage increasing effect was under T1, which increased soil water content by 2.8%–7.8%. Especially during the tuber formation in summer drought period, soil water content in the 0–200 cm soil layer under T1 was significantly higher than under both T2 and T3. In contrast to CK, T1 increased potato yield by 10.5%–34.2% and WUE by 8.9%–29.8% (with WUE of 108.9– 134.0 kg·hm^{-2}·mm^{-1}), and increased commodity potato rate by 14.7%–38.8% which reached to 82.3%–92.2%. There was significant positive correlation (r = 0.836) between potato productivity and soil water consumption during the potato growth period. There were significant differences (P < 0.05) in the yield and commodity rate of potato under T1 condition, which were significantly different from those under T2 and T3. This indicated that maize-straw strip covering maintained higher soil moisture and improved plant growth and yield formation. Its application improved the efficiently of rainfall utilization to realize stable and high yields of potato. Maize-straw strip covering was a new cultivation pattern which increased crop productivity and economic benefit of potato in semiarid rain-fed regions of Northwest China.

Keywords　Maize straw; Strip covering; Plastic film mulching; Soil moisture; Yield; Water use efficiency; Semiarid area; Potato

水分匮乏和土壤贫瘠是西北黄土高原半干旱区农业生产面临的主要问题。降低棵间无效的蒸发，提高土壤的蓄水、自然降水入渗效率以及作物水分利用效率是旱作农业发展的迫切需要，同时加强生态建设也是社会各界十分关注的重大科学问题。

马铃薯(*Solanum tuberosum*)是西北黄土高原半干旱区主要栽培作物和特色作物之一。目前生产上应用最广的覆盖技术主要包括地膜覆盖和秸秆覆盖，具有较好的保温保湿功能，能有效调节土壤微环境[1]。Zhang等[2]对国内地膜覆盖试验进行统计，发现超过60%的试验认为其可使作物普遍增产20%以上，对保障我国粮食安全作出了重大贡献；但也有约8%的试验认为其造成了作物减产。地膜残留污染也成为影响农业可持续发展的一个重大问题，受到许多学者的普遍关注[3–5]。而秸秆覆盖可以调节地温、抑蒸保墒，改善土壤结构，从而提高作物产量[6–8]；并随着覆盖秸秆的腐烂还田，0~20 cm土层土壤有机质、全氮、全磷、有效氮和有效磷含量均明显提高[9–10]；同时，能显著提高土壤有机碳含量[11–12]。近年来，各马铃薯产区相继开展了垄覆膜沟覆草种植、全膜覆盖垄沟种植、全膜覆盖垄上微沟种植、秸秆带状覆盖种植等栽培技术的研究与示范[13–18]，可提高马铃薯的降水利用效率和产量。Chandra等[19]研究得出在干旱少雨的年份里采用秸秆覆盖措施，能显著增加马铃薯产量。李倩等[20]报道，覆盖最有效地降低了土壤干旱，能显著提高马铃薯产量和商品薯率。侯慧芝等[13]研究表明，在干旱半干旱区全膜覆盖垄上微沟种植能显著提高马铃薯产量和水分利用效率。

马铃薯是喜凉作物，在半干旱区马铃薯在地膜覆盖种植条件下，季节性干旱胁迫和高湿胁迫并存，制约马铃薯产业快速发展。同时，甘肃省全膜双垄沟玉米年种植面积达87多万hm^2，生产了大量的玉米秸秆，秸秆的资源化利用问题受到越来越多的关注[21–23]。为此，本研究团队创建了玉米秸秆带状覆盖马铃薯栽培技术，该方法是利用秸秆局部覆盖、抗旱保墒的作物种植新技术，分秸秆覆盖带和种植带，两带相间排列。本文根据西北黄土高原半干旱区多年干旱少雨、降雨量时空分布不均、田间蒸发量大、农田生产低而不稳的特点，以传统种植不覆盖为对照，测定不同覆盖方式下马铃薯生育前期的水分含量分布及其产量，计算耗水量和水分利用效率，系统地比较分析了玉米秸秆带状覆盖和地膜覆盖对马铃薯土壤水分时空变化规律及产量的影响，以进一步明确和完善秸秆带状覆盖栽培技术增产的机理，为马铃薯秸秆带状覆盖高产栽培提供理论依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于2014—2015年在甘肃省通渭县平襄镇甘肃农业大学试验基地进行。该地海拔 1 750 m，年均气温 7.2 ℃，年日照时数 2 100~2 430 h，无霜期120~170 d，属中温带半干旱气候。作物一年 1 熟，为典型旱地雨养农业区。多年平均降水量为 390.7 mm，且主要集中于 7—9 月(占年降水量的 60%~65%)，2014 年通渭县降水量总量为 367.3 mm，其中马铃薯生育期降水量为 271.7 mm，占全年降水量的 74.0%。2015 年通渭县降水量总量为 377.7 mm，其中马铃薯

生育期降水量为281.2 mm，占全年降水量的74.5%。年蒸发量达1 500 mm，极易发生春旱。试验区土壤为黄绵土，0~30 cm土层平均容重为1.25 g·cm^{-3}。

1.2 试验设计

试验设4个处理，分别为：玉米秸秆带状覆盖(T1)、半膜大垄(T2)、全膜双垄(T3)和不覆盖露地平作(对照，CK)，小区面积80 m^2(16 m×5 m)，3次重复，随机区组排列。T1：播前7 d分秸秆覆盖带和种植带各60 cm，相间排列。秸秆覆盖带采用玉米整秆覆盖，覆盖量约52 500株·hm^{-2}，折合秸秆量约9 000.0 kg·hm^{-2}，约等于1 hm^{2}旱地玉米秸秆量；每种植带播种2行，穴距约33 cm的“品”字型穴播马铃薯。第1茬收获后田间继续保留覆盖的秸秆，第2茬覆盖带和种植带互换，继续接茬种植马铃薯，避免原位置连作，第2茬马铃薯收获后，将已经腐解程度较高的玉米秆旋耕打碎还田。T2：垄宽70 cm，高15 cm，垄沟宽50 cm。用90 cm宽的黑色地膜覆盖垄面，垄沟不覆盖。按每垄播种2行，行距50 cm，株距33 cm的“品”字型垄面穴播马铃薯。T3：大垄宽70 cm，高20 cm，小垄宽40 cm，高15 cm，留10 cm渗水带，用120 cm宽的黑色地膜全地面覆盖，按每幅播种2行，行距40 cm，株距33 cm的“品”字型大垄两侧穴播马铃薯。CK：平作不覆膜，常规对照种植大田。播种时等行距种植，行距60 cm，株距33 cm。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量的测定

在马铃薯播种前1 d、苗期、块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期和收获期，用土钻法从马铃薯种植行间取土样，按0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~90 cm、90~120 cm、120~150 cm、150~180 cm和180~200 cm 8个土层，用烘干法测定土壤含水量。

土壤含水量(%)=(土壤鲜质量−土壤干质量)/土壤干质量×100% (1)

1.3.2 土壤贮水量的计算

$$W=h\times\rho\times\omega\times10 \quad (2)$$

式中：W为土壤贮水量(mm)，h为土层深度(cm)，ρ为土壤容重(g·cm^{-3})，ω为土壤含水量(%)。

1.3.3 农田耗水量的计算

$$\mathrm{ET}=(W1-W2)+P \quad (3)$$

式中：ET为作物生育期耗水量(mm)，P为作物生育期≥5 mm有效降雨量，$W1$、$W2$分别为播前和收获时的土壤贮水量(mm)。

1.3.4 水分利用效率的计算

$$\mathrm{WUE}=Y/\mathrm{ET} \quad (4)$$

式中：WUE为水分利用效率(kg·mm^{-1}·hm^{-2})，Y为马铃薯产量(kg·hm^{-2})，ET为农田耗水量(mm)。

1.3.5 产量测定

马铃薯完全成熟后，每个小区随机选取15株进行室内拷种，并且依据重量分为3个等级：大(>150 g)、中(75~150 g)和小(<75 g)，分别调查每个等级的个数并称重，进行产量构成分析。调查单株结薯数和单株结薯重，计算商品薯率，商品薯率(%)=(单薯75 g以上的产量/马铃薯总产)×100%；收获时按小区测实产，取3次重复的平均值折算每公顷产量。

1.4 统计分析

采用Microsoft Excel 2016和SPSS 20.0软件进行数据处理和分析，并用Sigmaplot 12.5软件进行作图，差异显著性采用LSD法进行比较。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖处理对马铃薯产量和水分利用效率的影响

2.1.1 对马铃薯产量的影响

不同覆盖处理对马铃薯产量有显著影响。与对照相比，玉米秸秆带状覆盖能明显提高马铃薯产量、商品薯率，提高中大薯个数比例(表1)。2014年，T1处理马铃薯产量和商品薯率显著高于CK处理(P<0.05)，产量和商品薯率分别比CK提高10.5%和38.8%；T3处理产量较CK增产1.1%，商品薯率较CK提高9.1%；但T2处理产量则低于CK处理，降低了2.1%，而商品薯率较CK提高7.6%，产量和商品薯率T2、T3处理与CK差异不显著(P>0.05)。2015年，T1、T2、T3和CK的马铃薯产量显著高于2014年并与降水量密切相关(表1)。T1、T2和T3处理马铃薯产量显著高于CK(P<0.05)，分别比CK增产34.2%、28.3%、29.8%，商品薯率分别比CK提高14.7%、4.9%和6.5%，但T2和T3处理二者间无显著差异(P>0.05)。大薯率T1处理2年均显著高于CK处理(P<0.05)，中薯率和小薯率不同处理间存在显著差异。可见，两年马铃薯的增产效果以秸秆带状覆盖处理最为显著，分别较对照增产10.5%和34.2%，商品薯率分别比对照提高38.8%和14.7%；与地膜相比，2a秸秆带状覆盖处理较地膜覆盖增产3.4%~12.9%

2.1.2 对马铃薯耗水特征及水分利用效率的影响

不同覆盖方式对水分利用效率的影响不同，秸秆带状覆盖能够改善土壤水分状况，与地膜覆盖相比，秸秆带状覆盖具有显著的纳雨保墒作用，降低作物的耗水量，显著提高作物的水分利用效率。两年均表现为秸秆带状覆盖处理(T1)水分利用效率最高，T3处理次之，T2处理最低(表2)。2014年覆盖处理

表 1　不同覆盖处理对马铃薯产量性状的影响

Table 1　Yield components of potato under different mulching treatments

年份 Year	处理 Treatment	大薯率 Big tuber rate (%)	中薯率 Medium tuber rate (%)	小薯率 Small tuber rate (%)	单株结薯数 Potato number per plant	单株薯产量 Yield per plant (kg·plant^{-1})	薯块产量 Tuber yield (kg·hm^{-2})	增产率 Increase rate of yield (%)	商品薯率 Commodity rate (%)
2014	T1	21.9±1.5a	23.7±1.4c	54.4±2.6b	4.6±0.5a	618.9±21.1a	34 671.0±897.6a	10.5	82.3±3.0a
	T2	7.2±0.4c	35.8±2.9a	57.0±3.2b	6.0±1.0a	574.4±41.6ab	30 718.5±639.6b	−2.1	63.8±2.1b
	T3	9.6±1.6b	25.4±2.5c	65.1±3.8a	6.4±1.0a	546.7±30.9b	31 725.0±570.8b	1.1	64.7±3.2b
	CK	11.2±1.0b	29.6±1.8b	59.2±2.4b	5.6±0.8a	584.8±10.8ab	31 383.0±1623.5b		59.3±3.8c
2015	T1	29.9±2.9a	28.9±3.0ab	41.2±5.6c	6.4±0.6ab	853.1±28.9a	46 969.5±623.4a	34.2	92.2±2.0a
	T2	25.1±3.3b	29.6±3.1a	45.3±6.3b	5.6±0.5ab	816.9±6.1b	44 883.0±291.6b	28.3	84.3±2.7b
	T3	26.8±2.5b	25.1±2.2c	48.1±4.7b	5.1±1.0b	825.5±12.9b	45 417.0±415.2b	29.8	85.6±4.1b
	CK	17.5±2.5c	27.2±3.0bc	55.3±5.4a	6.7±0.7a	619.4±10.5c	34 990.5±745.5c		80.4±2.8c

T1：秸秆带状覆盖；T2：半膜大垄；T3：全膜双垄；CK：露地对照。同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。T1: strip mulching of maize straw on no-planted strip; T2: plastic film mulching on planted ridge only; T3: plastic film mulching on both planted ridge and no-planted furrow; CK: flat field planting without mulching. Values followed by different letters in the same column are significant difference at $P < 0.05$. The same below.

表 2　不同覆盖处理马铃薯的耗水量和水分利用效率

Table 2　Evapotranspiration and water use efficiency of potato under different mulching treatments

年份 Year	处理 Treatment	播前土壤贮水量 Soil water storage before sowing (mm)	收后土壤贮水量 Soil water storage after harvesting (mm)	生育期降水量 Precipitation during growth stage (mm)	作物耗水量 Evapotranspiration (mm)	水分利用效率 Water use efficiency (kg·hm^{-2}·mm^{-1})
2014	T1	471.6	426.0±14.6ab	271.7	318.3±14.6ab	108.9±3.9a
	T2	471.6	409.5±10.1b	271.7	334.8±10.1a	91.8±1.1c
	T3	471.6	417.7±6.0ab	271.7	326.6±6.0ab	97.1±0.9bc
	CK	471.6	430.5±7.1a	271.7	313.8±7.1b	100.0±3.6b
2015	T1	429.5±3.5b	360.3±4.9ab	281.2	350.4±6.8a	134.0±2.6a
	T2	434.9±17.4ab	352.1±15.1b	281.2	364.0±31.9a	123.3±11.2a
	T3	449.1±0.5a	380.3±26.5a	281.2	349.9±26.1a	129.8±10.0a
	CK	381.0±7.6c	323.1±0.9c	281.2	339.1±7.7a	103.2±2.3b

耗水量高于CK，除T2处理外三者间差异不显著，作物耗水量的大小顺序为：T2>T3>T1>CK。T1处理的水分利用效率显著高于T2、T3和CK(P<0.05)，而T2和T3、CK和T3处理间水分利用效率差异不显著(P>0.05)，T1处理的水分利用效率较CK提高8.9%；由于2014年降水较少，地膜耗水较多，T2和T3处理水分利用效率较CK分别降低8.2%和2.9%。2015年不同处理间作物耗水量差异不显著(P>0.05)，作物耗水量的大小顺序为：T2>T1>T3>CK。T1、T2和T3处理的水分利用效率分别较CK提高29.8%、19.5%和25.8%，与CK相比均呈显著性差异(P<0.05)，但覆盖处理间三者差异不显著(P>0.05)。可见，秸秆带状覆盖是西北干旱雨养区提高水分利用效率、有效蓄水保墒的有效途径。

2.2　不同覆盖处理下 0~200 cm 土壤贮水量动态变化

2年试验中，覆盖能显著提高土壤贮水量，不同生育阶段不同处理间存在显著差异(P<0.05)(图1)。2014和2015年各生育阶段土壤贮水量的变化趋势不尽一致，但总体趋势为：播种期>幼苗期>块茎增长期>淀粉积累期>成熟期(块茎形成期除外)。2014年表现为“高–低–高–低–高”的变化趋，2015年表现为“低–高–低–低–低”的变化趋势，这与生育期降水量和马铃薯不同阶段的耗水量有关。2014年和2015年覆盖处理全生育期0~200 cm土层平均贮水量比CK增加11.3 mm和28.2 mm。

2014年，玉米秸秆带状覆盖处理在不同生育阶段能显著提高0~200 cm土壤贮水量(图1A)。马铃薯播种到苗期，由于前期降水量偏少，地膜温度较高，作物蒸腾耗水量较大，覆膜处理的土壤贮水量比CK低2.2%，而T1处理生长较慢，土壤贮水量较CK增加4.1%。苗期到块茎膨大期，土壤贮水量以玉米秸秆带状覆盖的最高，比露地CK增加5.0%，半膜大垄(T2)与CK接近，T3处理土壤墒情略低于露地。淀粉积累期，由于T3处理马铃薯衰老较快，作物耗水量降低，0~200 cm土壤贮水量最高，T1次之，分别比CK增加5.4%和1.3%。马铃薯收获期，由于降水的补充，各处理土壤水分状况恢复明显，但处理间存在显著差异。

2015 年经过冬闲期蓄水保墒，播种期覆盖处理明显好于露地(图 1B)。由于前期降水丰沛，马铃薯苗期到块茎形成期，覆盖处理 0~200 cm 土壤墒情明显

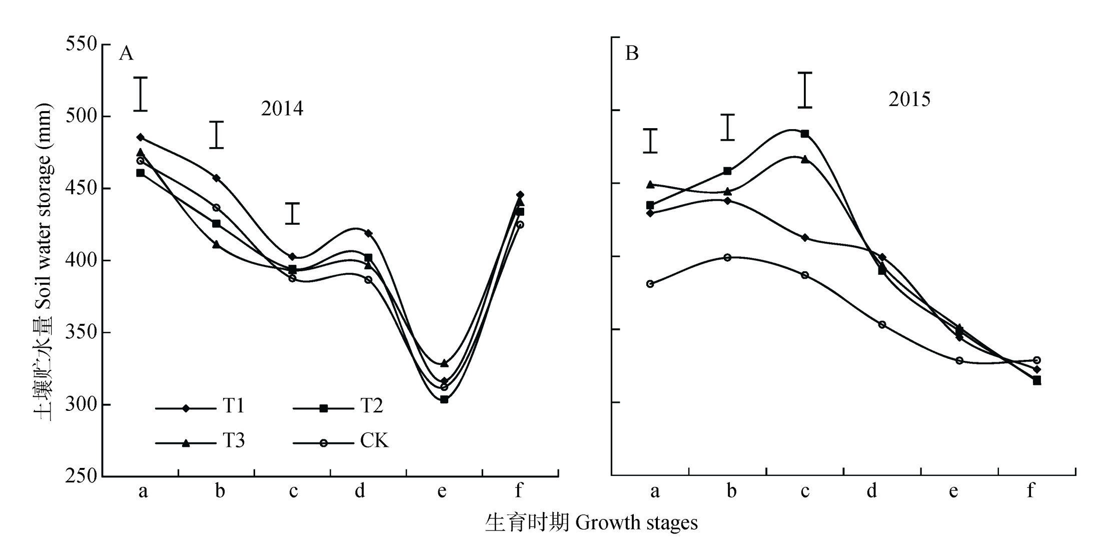


图 1 2014 年(A)和 2015 年(B)不同覆盖处理马铃薯各生育阶段 0~200 cm 土层土壤储水量

Fig. 1 Water storage capacity in the 0–200 cm soil layer during various growth stages of potato under different mulching treatments in 2014 (A) and 2015 (B)

a: 播前; b: 苗期; c: 块茎形成期; d: 块茎增长期; e: 淀粉积累期; f: 收获期. 误差线代表 LSD($P\leqslant0.05$), 下同。a: before sowing; b: seedling stage; c: tuber growth stage; d: tuber expending stage; e: starch accumulation stage; f: harvest stage. Error bars are the LSD at $P \leqslant 0.05$. The same below.

好于CK，以T2处理的土壤平均土壤贮水量最高、T3处理次之，T1处理最低。7月中旬，马铃薯进入需水关键期(块茎形成期)，降水较多，各处理土壤含水量明显增加。随气温升高，地上部分生长迅速，群体增大，农田蒸散主要以作物蒸腾为主，到块茎膨大期，干旱少雨，不同处理间土壤贮水量存在显著差异($P<0.05$)。由于玉米秸秆带状覆盖有明显的保墒和降温效应，块茎膨大期T1处理的贮水量最高，比CK处理显著增加13.1%。马铃薯生长后期持续干旱，造成地膜覆盖马铃薯早衰，干物质积累时间减少，蒸腾性生产耗水减少，到成熟期，覆盖处理的土壤贮水量明显不如CK。总体上，土壤水分动态与降水动态相符，降水量多的时期土壤贮水量高，反之亦然。可见，玉米秸秆带状覆盖对马铃薯中后期土壤水分的改善作用最好。

2.3 不同覆盖处理下不同土层和生育时期土壤水分变化

秸秆覆盖和地膜覆盖能改善马铃薯不同时期、不同土层土壤剖面水分的变化，但这与不同年份降水多少及格局密切相关，不同年份变化规律存在差异(图2)。不同深度的土壤含水量随根系消耗、土面蒸发和降水补给的变化而变化，从块茎形成期开始，上层土壤含水量由于易受降水、蒸散、作物生长的影响，变化幅度大，而中下层土壤则相对变化小。但在成熟期，各处理含水量0~20 cm土层明显高于20~40 cm土层，这与测定前遇到降水有关。不同处理下土壤水分垂直变化有所不同。播种到块茎形成期，马铃薯生长慢，耗水少，对照地表裸露，水分蒸发较大，0~200 cm土层覆盖处理的含水量明显好于CK。2014年T1和T2处理0~90 cm土层含水量较CK高6.4%，苗期120 cm以下土层平均低于CK；2015年，覆盖处理0~200 cm土层含水量普遍比CK高，这与漫长的冬季覆盖保墒以及该时期的降水量较多有关。

在块茎膨大期，马铃薯生长迅速，群体大，对水分的消耗量加大，0~90 cm土层覆盖处理含水量低于CK，而120 cm土层覆盖处理明显好于CK。2014年，T2、T3处理0~90 cm土层含水量低于CK，比CK低3.5%~6.7%，而秸秆覆盖(T1)具有保墒降温效应，马铃薯蒸腾较小，0~90 cm土层土壤含水量明显好于CK，T1处理比CK高11.4%。但在120 cm土层覆盖处理的含水量明显好于CK。2015年降水量较多，马铃薯生长过旺，群体大，覆膜处理尤为明显，耗水多，覆膜处理0~90 cm土层含水量比CK低4.3%，而秸秆覆盖T1处理0~90 cm土层波动变化，0~40 cm含水量低于CK，60~90 cm含水量明显高于CK，0~90 cm土层含水量平均比CK高3.1%。

淀粉积累期，0~200 cm 土层含水量不同处理差异不明显，2 个降水年型 0~200 cm 土层含水量变化趋势与 CK 接近，除 0~20 cm 和 40~60 cm 土层含水量差异显著外，其余土层各不同处理间差异不显著。0~90 cm 土层覆盖处理的土壤含水量比 CK 高 2.2%~5.1%，而覆膜处理又高于秸秆覆盖处理，这与秸秆覆盖淀粉积累时间长、植物耗水多有关。90 cm 土层

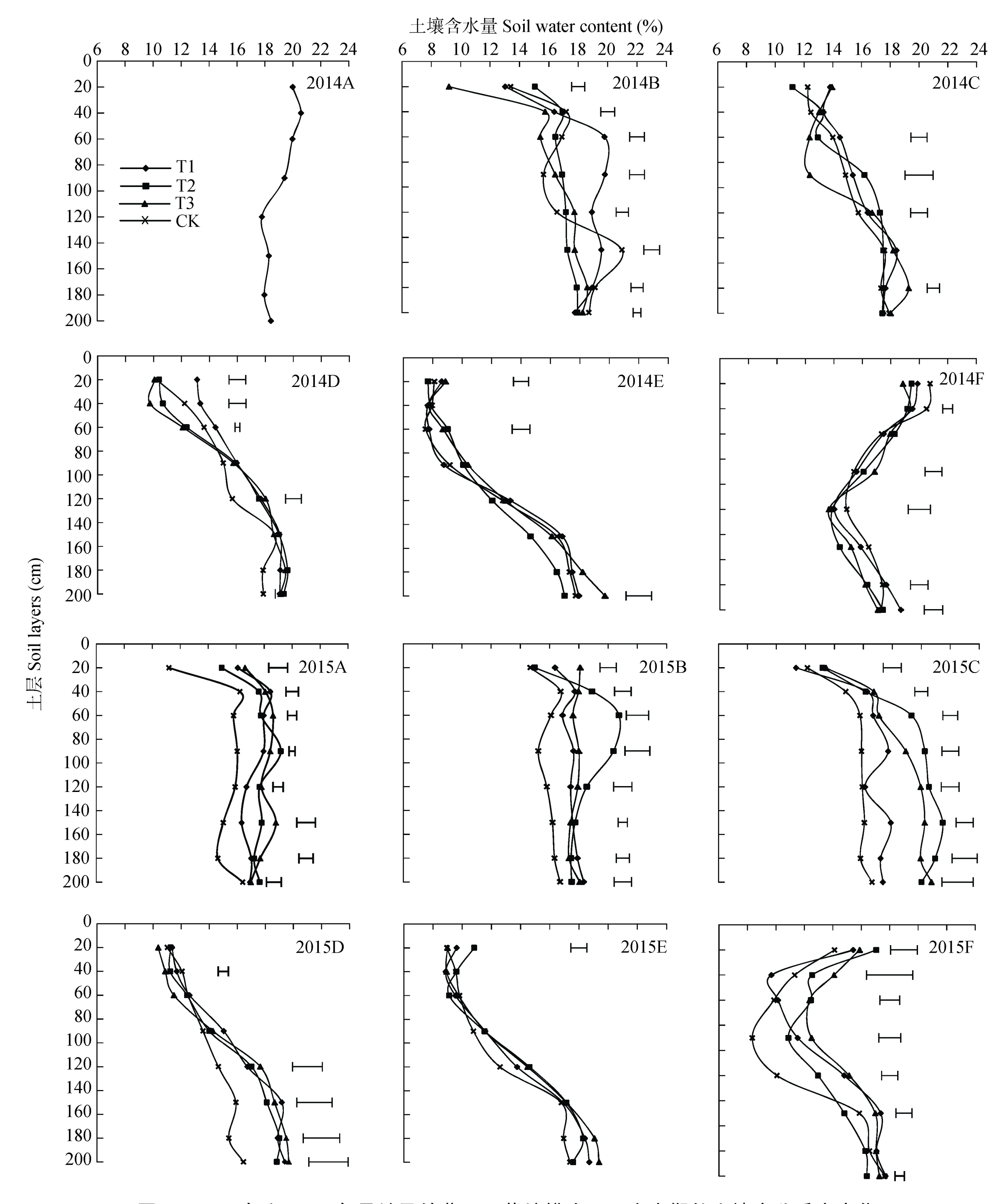


图 2　2014 年和 2015 年旱地马铃薯不同栽培模式不同生育期的土壤水分垂直变化

Fig. 2　Vertical changes of soil water content at different growth stages of potato under different mulching treatments in 2014 and 2015

A：播前；B：苗期；C：块茎形成期；D：块茎增长期；E：淀粉积累期；F：收获期。A: before sowing; B: seedling stage; C: tuber growth stage; D: tuber expending stage; E: starch accumulation stage; F: harvest stage.

土壤含水量2年的结果不一致，2014年覆盖处理与CK持平，而2015年覆盖处理较CK高6.8%，这主要与2015年马铃薯生育期降水量多有关。

成熟期，0~200 cm土层含水量不同处理差异明显，2014年成熟降水，补充了0~60 cm土层的土壤含水量，不同处理差异较小。而2015年马铃薯生育后期无有效降水，加上植株群体差异大，造成不同土层不同处理间差异明显，0~200 cm土层的含水量覆盖处理明显高于CK，比CK高11.9%。

综合2年的试验结果，覆盖能显著改善马铃薯生育期0~200 cm土壤墒情，除块茎膨大期外，覆盖处理始终普遍高于CK；处理间0~200 cm土层墒情的差异以块茎形成期、块茎形成期、块茎膨大期差异较大，以淀粉积累期差异较小。

2.4 不同覆盖处理下 0~200 cm 各土层土壤贮水消耗量

覆盖能够改善土壤的水分状况，进而影响马铃薯的生长状况，作物各土层的耗水也随之改变(表3)。0~200 cm土层土壤贮水消耗量覆膜大于秸秆覆盖，两年覆膜和秸秆覆盖平均分别较CK多耗水16.9~17.9 mm和4.5~11.3 mm；土壤贮水消耗大部分集中在0~120 cm土层，0~120 cm土壤贮水消耗比例2014年表现为：T1(80.0%)>CK(72.7%)>T3(65.4%)>T2(56.9%)，2015 年 为 CK(122.5%)>T1(107.7%)>T3 (87.0%)>T2(77.8%)。可见，覆盖能明显提高土壤深层用水比例和深层的用水量。

表 3 2014 年和 2015 年旱地马铃薯不同覆盖处理不同土层的土壤贮水消耗量
Table 3 Consumption of storage water in different soil layers under different mulching treatments in 2014 and 2015 mm

年份 Year	处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm) 0~20	20~40	40~60	60~90	90~120	120~150	150~180	180~200	土壤贮水总消耗量 Total consumption of soil storage	总耗水量 Total water consumption
2014	T1	0.3±0.5c	2.6±0.5b	6.2±0.8a	14.2±1.9a	14.0±2.0ab	8.9±2.5a	1.0±6.8a	−0.7±3.8b	46.6±14.6d	318.3±14.6ab
	T2	1.3±0.3b	3.5±0.5a	4.2±1.7a	12.4±1.2b	14.5±0.4ab	15.7±4.9a	7.1±4.5a	4.3±1.0a	63.1±10.1a	334.8±10.1a
	T3	2.8±0.6a	3.1±1.2ab	5.0±0.9a	9.5±1.4c	15.5±0.6a	10.3±6.4a	5.4±2.9a	3.3±0.5a	54.9±5.9b	326.6±6.0ab
	CK	−1.9±0.7d	0.2±0.4c	6.5±0.4a	15.0±0.8a	10.8±2.7b	6.9±4.0a	2.0±1.2a	2.7±0.4ab	42.1±7.1d	313.8±7.1b
2015	T1	1.7±0.6a	21.9±0.5a	19.5±0.2a	24.1±0.6a	7.3±0.4b	−3.6±3.3b	0.1±3.2ab	−1.8±2.1b	69.2±6.8b	350.4±6.8a
	T2	−6.5±6.2b	11.4±10.3ab	12.2±3.2b	28.7±4.7a	18.6±3.4a	11.3±5.7a	3.7±1.6a	3.3±1.5a	82.8±31.9a	364.0±31.9a
	T3	1.9±4.7a	10.0±0.7b	15.7±3.4ab	22.2±7.1a	10.0±5.2b	7.0±3.4a	2.6±7.5a	−0.6±1.4b	68.7±26.1b	349.9±26.1a
	CK	−7.3±1.6b	12.4±1.5ab	14.9±1.1b	29.0±1.6a	21.9±2.2a	−2.9±2.0b	−7.1±1.1b	−3.0±2.1b	57.9±7.7c	339.1±7.7a

相关分析表明，马铃薯产量与水分利用效率(r=0.801*)、生育期耗水量(r=0.836**)均呈显著正相关，而耗水量与水分利用效率相关不显著(r=0.352)。

3 讨论与结论

秸秆覆盖能抑制土壤水分蒸发，改善了作物生长的水环境，促进作物对土壤水分的有效利用，进而提高作物产量和水分利用效率[7,14,18,24−26]。秸秆覆盖在马铃薯上的效应效果更为明显，有利于马铃薯产量和商品薯率的提高[27]。段义忠等[28]研究发现，秸秆覆盖与绿肥覆盖能有效地防止地表径流，蓄水、保水以及保肥能力较强。侯贤清等[29]在宁南山区研究表明，免耕条件下不同覆盖方式能有效改善马铃薯生育期0~200 cm土层土壤水分状况，免耕覆盖地膜对作物生长前期土壤水分保蓄效果较好，免耕覆盖秸秆对作物生长中后期土壤水分状况的改善作用最佳。免耕覆秸秆处理的马铃薯产量和商品薯率最高，较翻耕不覆盖增产24.1%。本试验结果表明，玉米秸秆带状覆盖模式下马铃薯的商品率、大薯率不同程度地提高，小薯率明显下降，从而显著提高了马铃薯产量和水分利用效率，产量和水分利用效率增幅分别为10.5%~34.2%和8.9%~29.8%。玉米秸秆带状覆盖能改善土壤水分状况，减少无效消耗，尤其能显著提高马铃薯中后期的土壤含水量，促进马铃薯根系对土壤水分的吸收利用，促进了地上部分和地下部分生长，延缓马铃薯植株的衰老，进而提高了水分利用效率。这与高世铭等[18]和许静等[16]的研究结论基本一致。

前人[30−31]研究证明：温度对马铃薯生长有明显影响，低温下结薯较早，高温结薯延迟，块茎形成期则以土温16~18 ℃对块茎的形成和增长最为有利，当土温超过25 ℃时块茎几乎停止生长，土温达到29 ℃以上时茎叶生长也严重受阻。本研究发现，0~200 cm土壤贮水消耗量覆膜大于秸秆覆盖，在季节性干旱年份，全膜双垄沟的马铃薯出现减产现象，可能是覆膜改变了土壤温度所致，马铃薯前期温度较高，地上部分生长旺盛，蒸腾耗水较多，后期降水量减少，导致马铃薯在中后期(膨大期到收获期)发生水分亏缺[17]，影响了块茎的膨大。而作物秸秆带状覆盖采用“种的地方不覆、覆的地方不种”的栽培模式，在马铃薯关键生育期，具有降温保墒双重效应，对作物的生长发育和产量的形成有显著促进效应[27,32]，这与李静静等[7]的研究结果一致。本文通过两年试验研究发现，玉米秸秆带状覆盖技术解决了传统秸秆覆盖技术前期降温效应，同时兼顾了蓄水保墒效应，尤其干旱年份，对马铃薯增产和水分利用效率提高效果明显，玉米秸秆带状覆盖为半干旱雨养区马铃薯适宜的抗旱节水高产模式。

参考文献 References

[1] 林叶春，曾昭海，唐海明，等. 双季稻田马铃薯不同覆盖栽培对土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 13−18

Lin Y C, Zeng Z H, Tang H M, et al. Soil enzyme activity in spring potato fields under different mulching practices in double rice cropping area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1): 13–18
[2] Zhang S L, Sadras V, Chen X P, et al. Water use efficiency of dryland wheat in the loess plateau in response to soil and crop management[J]. Field Crops Research, 2013, 151: 9–18
[3] 李青军, 危常州, 雷咏雯, 等. 白色污染对棉花根系生长发育的影响[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(5): 769–775
Li Q J, Wei C Z, Lei Y W, et al. Influence of white pollution on root growth of cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(5): 769–775
[4] 何文清, 严昌荣, 刘爽, 等. 典型棉区地膜应用及污染现状的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1618–1622
He W Q, Yan C R, Liu S, et al. The use of plastic mulch film in typical cotton planting regions and the associated environmental pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(8): 1618–1622
[5] 严昌荣, 刘恩科, 舒帆, 等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 95–102
Yan C R, Liu E K, Shu F, et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(2): 95–102
[6] Govaerts B, Sayre K D, Deckers J. Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting?[J]. Field Crops Research, 2005, 94(1): 33–42
[7] 李静静, 李从锋, 李连禄, 等. 苗带深松条件下秸秆覆盖对春玉米土壤水温及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1787–1796
Li J J, Li C F, Li L L, et al. Effect of straw mulching on soil temperature, soil moisture and spring maize yield under seedling strip subsoiling[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(10): 1787–1796
[8] Wang Q J, Lu C Y, Li H W, et al. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-year experiment on alkaline soils of northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 137: 43–49
[9] Du Z L, Ren T S, Hu C S. Tillage and residue removal effects on soil carbon and nitrogen storage in the north China Plain[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 196–202
[10] 王海霞, 孙红霞, 韩清芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1025–1030
Wang H X, Sun H X, Han Q F, et al. Effects of straw mulching on the soil aggregates in dryland wheat field under no-tillage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 1025–1030
[11] 卜玉山, 邵海林, 王建程, 等. 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 322–326
Bu Y S, Shao H L, Wang J C, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 322–326
[12] Blanco-Canqui H, Lal R, Post W M, et al. Changes in long-term no-till corn growth and yield under different rates of stover mulch[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(4): 1128–1136
[13] 侯慧芝, 王娟, 张绪成, 等. 半干旱区全膜覆盖垄上微沟种植对土壤水热及马铃薯产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1582–1590
Hou H Z, Wang J, Zhang X C, et al. Effects of mini-ditch planting with plastic mulching in ridges on soil water content, temperature and potato yield in rain-fed semiarid region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(10): 1582–1590
[14] 范士杰, 王蒂, 张俊莲, 等. 不同栽培方式对马铃薯土壤水分状况和产量的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 271–279
Fan S J, Wang D, Zhang J L, et al. Effects of tillage strategies on the topsoil water content and the yield of potato[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 271–279
[15] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 852–864
Zhang X C, Yu X F, Wang H L, et al. Regulations of reduced chemical nitrogen, potassium fertilizer application and organic manure substitution on potato water-fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system on semi-arid area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5): 852–864
[16] 许静, 唐晓红, 陈松柏, 等. 秸秆覆盖对坡耕地土壤性状和马铃薯产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 333–336
Xu J, Tang X H, Chen S B, et al. Effects of straw mulch on soil properties and tomato productivity on slope land[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(6): 333–336
[17] 秦舒浩, 张俊莲, 王蒂, 等. 覆膜与沟垄种植模式对旱作马铃薯产量形成及水分运移的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 389–394
Qin S H, Zhang J L, Wang D, et al. Effects of different film mulch and ridge-furrow cropping patterns on yield formation and water translocation of rainfed potato[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 389–394
[18] 高世铭, 张绪成, 王亚宏. 旱地不同覆盖沟垄种植方式对马铃薯土壤水分和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 249–251
Gao S M, Zhang X C, Wang Y H. Influence of different mulching and furrow-ridge planting methods on soil moisture and yield of potato on dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 249–251
[19] Chandra S, Singh R D, Bhatnagar V K, et al. Effect of mulch and irrigation on tuber size, canopy temperature, water use and yield of potato (*Solonum tuberosum*)[J]. Indian Journal of Agronomy, 2002, 47(3): 443–448
[20] 李倩, 刘景辉, 张磊, 等. 适当保水剂施用和覆盖促进旱作马铃薯生长发育和产量提高[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 83–90
Li Q, Liu J H, Zhang L, et al. Using water-retaining agent and mulch to improve growth and yield of potato under dry farming[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 83–90
[21] 包建财, 郁继华, 冯致, 等. 西部七省区作物秸秆资源分布及利用现状[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 181–187

Bao J C, Yu J H, Feng Z, et al. Situation of distribution and utilization of crop straw resources in seven western provinces, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 181–187

[22] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1504–1510
Wang R F, Zhang J W, Dong S T, et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1504–1510

[23] 韦茂贵, 王晓玉, 谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32–44
Wei M G, Wang X Y, Xie G H. Field residue of field crops and its temporal distribution among thirty-one provinces of China[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 32–44

[24] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展Ⅰ. 不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 63–68
Cai T Y, Jia Z K, Huang Y W, et al. Research progress of comprehensive effect under different rates straw mulch on the rainfed farming areas, China Ⅰ. Effect of different rates of straw mulch on farmland eco-environment[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 63–68

[25] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1249–1258
Wang M, Wang H X, Han Q F, et al. Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1249–1258

[26] 吴晓丽, 汤永禄, 李朝苏, 等. 秋季玉米秸秆覆盖对丘陵旱地小麦生理特性及水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(6): 929–937
Wu X L, Tang Y L, Li C S, et al. Effects of autumn straw mulching on physiological characteristics and water use efficiency in winter wheat grown in hilly drought region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(6): 929–937

[27] 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 115–123
Li R, Hou X Q. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 115–123

[28] 段义忠, 亢福仁. 不同覆盖材料对旱地马铃薯土壤水热状况及其水分利用效率的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 55–59
Duan Y Z, Kang F R. Influences of different mulching treatments on soil temperature, water content, and water use efficiency of dryland planted with potato[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 55–59

[29] 侯贤清, 李荣. 免耕覆盖对宁南山区土壤物理性状及马铃薯产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 112–119
Hou X Q, Li R. Effects of mulching with no-tillage on soil physical properties and potato yield in mountain area of southern Ningxia[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 112–119

[30] 韩秀峰, 梁春波, 石瑛, 等. 大垄栽培条件下的土壤环境与马铃薯产量[J]. 中国马铃薯, 2006, 20(3): 135–139
Han X F, Liang C B, Shi Y, et al. Effects of big ridge on soil environments and potato yield[J]. Chinese Potato Journal, 2006, 20(3): 135–139

[31] 谢世清. 温度对马铃薯块茎形成膨大的影响[J]. 云南农业大学学报, 1992, 7(4): 244–249
Xie S Q. Effect of temperature on the tuber initiation and bulking of potato[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1992, 7(4): 244–249

[32] Sharma A R, Singh R, Dhyani S K, et al. Moisture conservation and nitrogen recycling through legume mulching in rainfed maize (*Zea mays*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 87(2): 187–197